

Technologie IGBT7 nouvelle génération : la gestion d'alimentation polyvalente et simplifiée

Par Amit Gole, responsable du marketing produit pour le département des solutions d'alimentation intégrées de Microchip Technology

Description/Résumé

Les transistors bipolaires à grille isolée (IGBT) sont depuis longtemps largement utilisés dans l'industrie, combinant les avantages de la haute puissance à des mécanismes de pilotage simples. La nouvelle technologie IGBT7 possède quelques différences au niveau des caractéristiques du composant, comme une tension directe plus faible, des courants nominaux plus élevés, une capacité de surcharge à 175 °C, un meilleur contrôle de l'échelon dv/dt et une diode Flyback améliorée. Quand elle est associée à un boîtier innovant à faible inductance, la technologie IGBT7 offre la facilité d'utilisation, une robustesse améliorée, des densités de puissance plus fortes ainsi qu'une efficacité améliorée, tout en réduisant par ailleurs les coûts système. Essentiels pour les applications de commande de moteur, les composants IGBT7 polyvalents vont offrir de nouvelles perspectives à de nombreux marchés, tels que l'aérospatiale, les énergies renouvelables, les systèmes de stockage d'énergie (ESS), les centres de données et les véhicules commerciaux et agricoles.

Un transistor bipolaire à grille isolée (IGBT, pour *Insulated-Gate Bipolar Transistor*) est un composant de puissance à semi-conducteur constitué d'un collecteur, d'un émetteur et d'une grille. Son nom de transistor bipolaire lui vient de ce que la conduction se produit à cause du déplacement d'électrons et de trous. Les transistors IGBT sont des atouts puissants pour de nombreuses applications d'électronique de puissance, y compris les convertisseurs d'énergie, les onduleurs et les hacheurs. Les IGBT sont largement utilisés dans les systèmes et équipements alimentés par le secteur, avec des performances de commutation moyenne ou haute tension à partir de quelques kW jusqu'à plusieurs MW. Les modules de puissance IGBT sont des composants essentiels dans l'électronique de puissance contemporaine. Ils commandent et convertissent l'alimentation électrique dans de nombreuses applications, dont les entraînements de moteurs industriels, les systèmes d'énergie renouvelable, les véhicules électriques (VE) et les réseaux électriques.

Nouvelle génération IGBT7

La septième génération de modules de puissance IGBT est désormais disponible, déclinée en sept boîtiers sous différentes références. Ces composants intègrent une tension V_F et une tension $V_{CE(sat)}$ plus faibles, une capacité de surcharge à T_J 175 °C, une capacité de courant plus élevée de 50 %, une contrôlabilité dv/dt améliorée, une douceur FWD améliorée et un pilotage plus simple par rapport aux générations précédentes. Ces caractéristiques constituent une valeur ajoutée en termes de densité de puissance, durabilité, coûts systèmes, efficacité, facilité d'utilisation et délais de commercialisation.

Technologie Trench IGBT7

Le transistor IGBT Trench7 utilise la technologie Trench Micro-Pattern (MPT), qui consiste en des cellules organisées en tranchées parallèles séparées par des plateaux submicroniques, à la différence des cellules organisées en tranchées de forme carrée utilisées dans les générations précédentes. La figure 1 ci-dessous montre une coupe transversale des différentes technologies existantes, depuis les IGPT perforés (Punch Through) jusqu'aux IGPT7. Le stockage de porteurs près de l'électrode de l'émetteur augmente pour les cellules en tranchée de l'IGBT, à cause de l'espacement plus petit entre les cellules et des plateaux étroits entre les grilles. La conductivité électrique est améliorée dans la zone de saturation grâce à cela, ce qui à son tour réduit considérablement la tension directe, entraînant une diminution des pertes de conduction pour la technologie IGBT7.

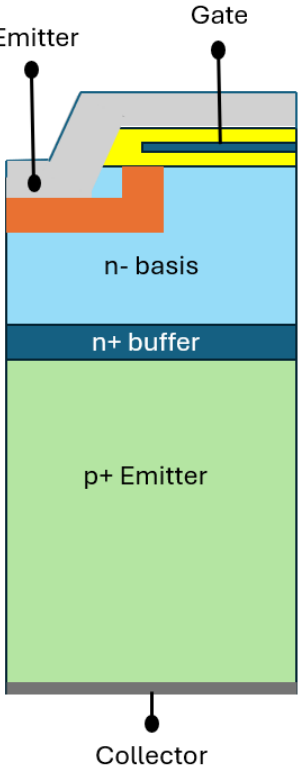
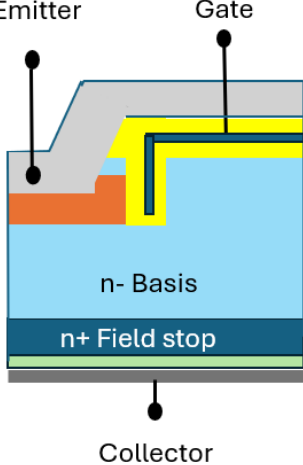
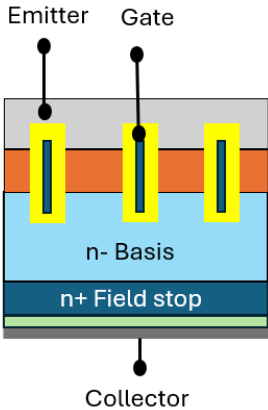
IGBT perforés (PT)	IGBT Trench 4 Field Stop	IGBT Trench 7 Micro Pattern Trenches
		
<ul style="list-style-type: none"> • $V_{CE(sat)}$ plus élevée • Pertes de commutation plus élevées • Robuste 	<ul style="list-style-type: none"> • Pertes de commutation réduites • Robustesse améliorée 	<ul style="list-style-type: none"> • $V_{CE(Sat)}$ and V_F plus faibles • Douceur améliorée • Meilleure robustesse • Précision du pilotage • Meilleures permanences en cas de court-circuit

Figure 1. Évolution des technologies IGBT

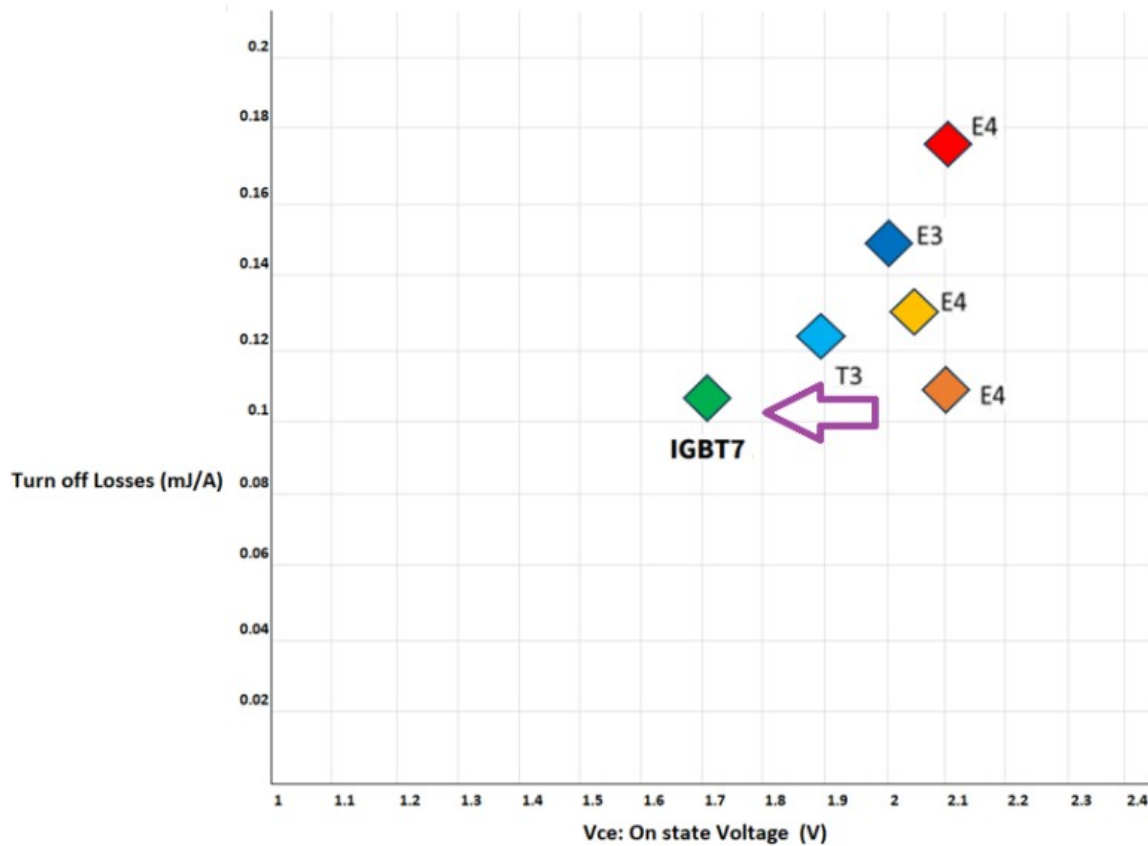


Figure 2. Comparaison des technologies IGBT (IGBT3 (T3/E3) à TVJ (op) : 125 °C, tandis que IGBT4 et IGBT7 à TVJ (op) : 150 °C

La figure 2 montre une comparaison relative entre les différentes générations d'IGBT, dont 2, 3, 4 et la toute dernière IGBT7. L'IGBT7 affiche la tension à l'état passant la plus faible, de l'ordre de 15 à 20 % en moins par rapport à la précédente génération IGBT4. Cette faible perte à l'état passant entraîne des pertes de conduction faibles qui, à leur tour, augmentent l'efficacité pour les applications de faible à moyenne fréquence de commutation. De plus, l'IGBT7 comprend également une diode douce placée en antiparallèle, qui bénéficie de meilleures caractéristiques de récupération de la réserve et d'une faible tension directe (V_f), réduisant ainsi davantage les pertes afin de fournir une densité de puissance plus élevée.

Portefeuille IGBT7

Les modules de puissance IGBT sont disponibles en boîtiers standard de 62 mm pour des montages en demi-pont (ou bras de phase) en boîtier D3 et en configuration « simple commutateur » en boîtiers D4. Microchip offre des boîtiers faible inductance/profil bas de 62 mm, comme les SP6C, SP6P et SP6LI, qui affichent une hauteur de profil réduite et une inductance de boîtier plus faible tout en permettant une forte densité de puissance et une haute fiabilité. Des niveaux de puissance plus faibles peuvent être atteints grâce à des boîtiers plus petits, comme les SP1F et SP3F, qui sont également des boîtiers profil bas disponibles selon différentes configurations. Ils existent avec des tensions nominales de 900 A, 1200 V et 1700 V.

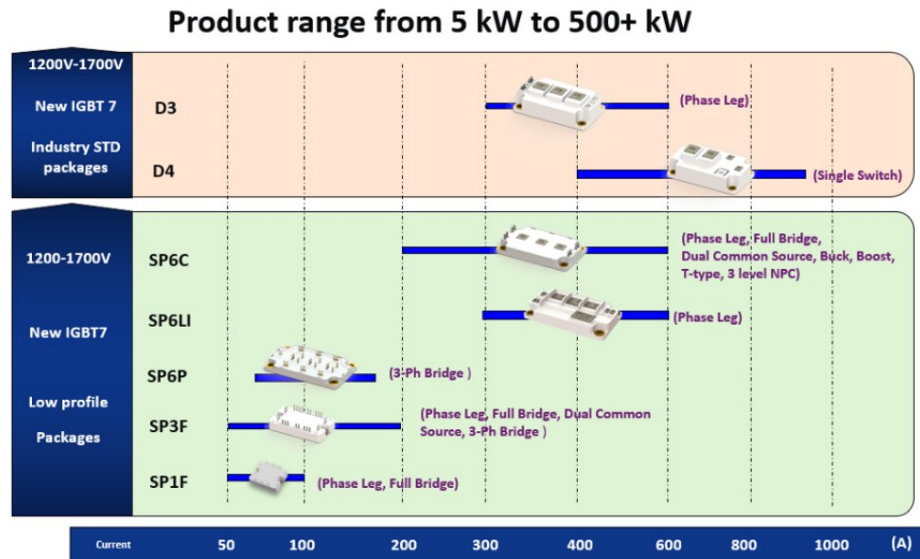


Figure 3. Portefeuille IGBT7

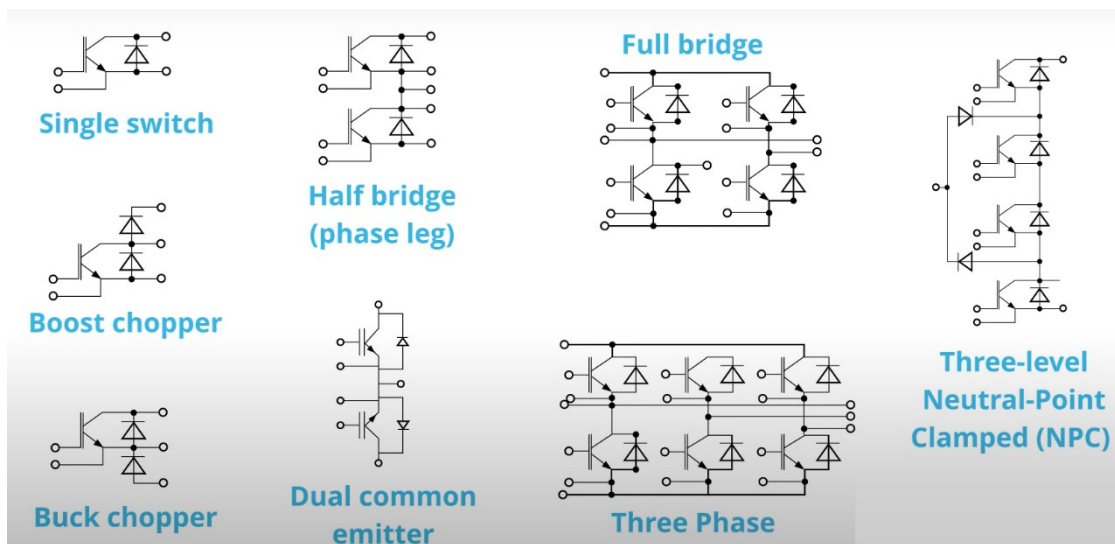


Figure 4. Topologies IGBT7

Num .	Caractéristiques du portefeuille IGBT7	Avantages pour l'application	Avantages pour l'utilisateur
1	Tension V_{CE} (sat) à l'état passant plus faible et tension V_F avec douceur FWD améliorée	Pertes de puissance 15 % plus faibles vs. IGBT4	Haute efficacité
2	Capacité de surcharge à TVJ (op) de 175 °C	Flexibilité de conception, évite le surdimensionnement	Fiabilité, bon rapport coût/efficacité
3	Contrôlabilité améliorée du dv/dt	Contrôle précis, moins de problèmes EMI	Fiabilité, facilité d'utilisation
4	Optimisé pour un pilotage simple	Système de pilotage simplifié	Facilité d'utilisation
5	Capacités de courant plus élevées	Moins de besoin de mise en parallèle, changement de hauteur d'axe	Densité de puissance élevée, délais de commercialisation accélérés
6	Inductance plus faible/profil bas des boîtiers	Évite le surdimensionnement	Fiabilité, coûts réduits

Tableau 1. Fonctionnalités du portefeuille IGBT7, avantages pour l'application et pour l'utilisateur final

Tension V_{CE} (sat) à l'état passant et tension V_F plus faible grâce à l'amélioration FWD

Grâce à une tension à l'état passant 15 à 20 % plus faible, les pertes sont réduites significativement y compris pour les applications à fréquence de commutation moyenne, tandis que les pertes de conduction à la limitation dv/dt donnée sont diminuées, tout comme la perte des diodes placées en antiparallèle.

Les pertes de conduction des IGBT sont directement proportionnelles à la tension V_{CE} (sat) de la technologie IGBT. L'IGBT7 affiche une tension V_{CE} (sat) de 1,77 V à T_J 175 °C, ce qui est bien moindre que la tension V_{CE} (sat) du IGBT4, qui est de 2,1 V à une T_{vj} de 150°C. La

réduction de la tension VCE (sat) d'environ 15 % réduit les pertes de conduction de façon significative.

Par ailleurs, la tension directe réduite de la diode placée en antiparallèle permet de réduire les pertes de diode, de sorte que la diode améliorée réduit la tension directe de 100 mV par rapport au IGBT4, ce qui réduit d'autant plus la conduction.

- Perte de conduction totale = perte de conduction IGBT + perte de conduction de diode
- Perte de commutation totale = perte de commutation IGBT + perte de commutation de diode
- Perte de puissance totale = perte de commutation totale + perte de puissance totale
- Efficacité = puissance de sortie/puissance d'entrée = puissance d'entrée + perte de puissance totale/puissance d'entrée

Technologie	IGBT4	IGBT7	Différence	% de réduction
Référence	APTGL325A120D3G	APTGX300A120D3G		
Boîtier	D3 standard 62 mm			
VCE (sat) typique à TJ = 125 °C VGE = 15 V IC = 300 A	2,2 V	1,7 V	0,5 V	22,72 %

Tableau 2. Exemple de comparaison entre les spécifications de tension VCE (sat) IGBT4 et IGBT7

La capacité de surcharge à TVJ (op) est de 175 °C

Température de jonction maximale de 175 °C, contre 150 °C pour l'IGBT4, ce qui est essentiel pour les entraînements de moteurs soumis à des surcharges répétitives de courte durée. Les modules de puissance IGBT7 sont conçus pour les applications complexes car ils peuvent supporter une température de jonction de 175 °C en condition de surcharge, à mettre en relation avec les 150 °C de l'IGBT4. Cette amélioration de 25 °C entraîne non seulement des avantages considérables en termes de fiabilité et de durabilité de l'onduleur de l'entraînement, mais peut également apporter des avantages économiques grâce à l'excellent rapport coût/efficacité de l'IGBT7 comparé à toute autre technologie.

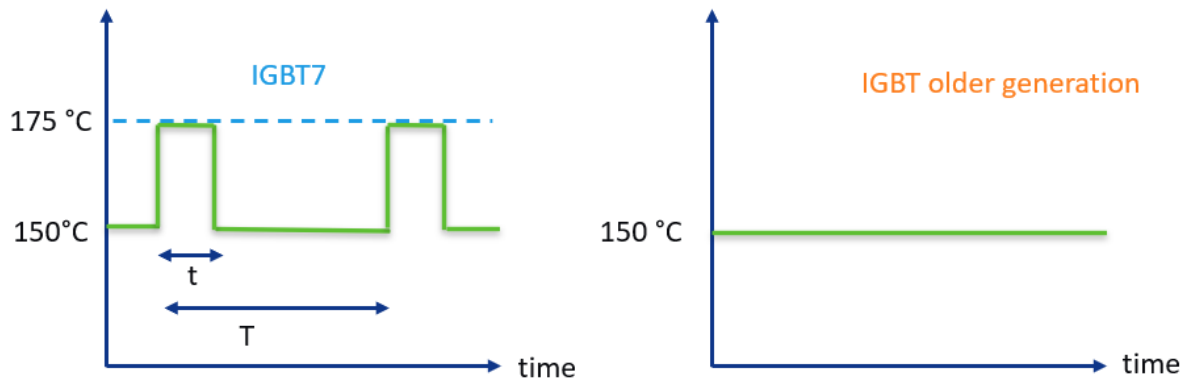


Figure 5. Comparaison de la température de jonction maximale entre l'IGBT7 et les générations précédentes d'IGBT

Les pilotes de moteur d'onduleurs sont utilisés dans de nombreuses applications, comme les véhicules commerciaux et agricoles, les installations industrielles et l'industrie ferroviaire, où il est important de supporter la surcharge de courte durée tout en fonctionnant à la température de fonctionnement normale pendant moins d'une minute/60 secondes.

Surcharge momentanée/Courant de base	Intervalle de temps entre les surcharges (en minutes)
110 %	≥ 9
125 %	≥ 28
150 %	≥ 60

Tableau 3. Exemple de durées de surcharge pour les moteurs polyphasés alimentés par un onduleur (conforme ANSI/NEMA MG 1-2016 (version 2018))

Cela est également vrai pour les applications comme les alimentations sans interruption, pour lesquelles les surcharges de courte durée sont critiques pour les spécifications de puissance, où les durées de surcharge typiques peuvent varier énormément, par exemple 110 % pendant 10 min+, 125 % pendant 120 sec+ et 150 % pendant 15 sec.

Pendant ces intervalles, l'onduleur et, à leur tour, les commutateurs, transportent plus de courant, ce qui provoque des températures de jonction supérieures. Le commutateur de puissance doit pouvoir supporter de façon intrinsèque une telle surcharge, ainsi que

l'usure et les dommages causés par leur nature répétitive, tout au long de sa durée de vie. Les surcharges répétées font partie des applications de moteur industriel et doivent être prises en compte lors de la conception de l'onduleur et du choix des commutateurs à semi-conducteurs de puissance adéquats. Il est important de maintenir la durabilité du commutateur lors de la survenue de ces intervalles de surcharge, afin de préserver la continuité et le bon fonctionnement.

Contrôlabilité améliorée du dv/dt

Le haut niveau de contrôlabilité (capacité à varier l'échelon dv/dt en ajustant la valeur de la résistance de la grille (R_g)) doit respecter les exigences d'isolation du moteur ou les limitations EMI. Les onduleurs qui sont utilisés pour piloter le moteur utilisent des signaux de modulation d'impulsion (PWM, *Pulse-Width Modulation*) pour produire des formes d'ondes de tension de sortie sinusoïdales. Outre des harmoniques d'ordre inférieur, ces formes d'ondes ont également, superposés sur celles-ci, des pics de tension à front raide et amplitude unique. L'isolation tour à tour, phase à phase et à la terre des enroulements du stator est soumise aux contraintes diélectriques qui en résultent. La fréquence de commutation élevée implique des temps de montée d'impulsions plus élevés et plus raides. Ce temps de montée d'impulsions plus élevé des commutations entraîne un dv/dt élevé, ce qui est renforcé par les longs câbles utilisés dans l'application d'entraînement du moteur entre l'onduleur et le moteur, provoquant des tensions de crête plus élevées précisément aux bornes du moteur. Le temps de montée pourrait également endommager les paliers à cause des courants parasites circulant entre le rotor et le châssis du moteur. Ces pics de tension dangereusement élevés à cause du temps de montée peuvent entraîner la formation d'arcs et, à terme, une défaillance de l'isolation. Plus les câbles du moteur sont longs, plus les dépassements de tension sont élevés, avec des valeurs de crête jusqu'à 5 fois supérieures à la tension de fonctionnement du système (> 200 V pour des systèmes de 415 V). Les pics de tension élevés peuvent entraîner une rupture de l'isolation, ce qui se traduit par des courts-circuits entre phases ou entre tours, avec des déclenchements de surintensité ultérieurs par le capteur de l'entraînement.

C'est pourquoi les fabricants de moteurs recommandent fermement de ne pas dépasser l'échelon dv/dt de 5 kV/ μ s aux bornes de l'onduleur dans le pire des cas pour des moteurs triphasés avec des tensions habituellement de 380/415/440 VAC.

Plus la longueur de la connexion entre le moteur et l'onduleur est importante, plus il y a de risques de pics dv/dt et avec de fortes pentes, ce qui peut augmenter dangereusement la tension aux bornes du moteur. Il est important d'optimiser l'échelon de tension dv/dt en fonction des exigences d'isolation du moteur lors de la conception de l'entraînement industriel à usage général. Pour permettre cette optimisation, l'IGBT7 affiche les plus hauts niveaux de perfection en matière de contrôle de la capacité de l'onduleur à changer le dv/dt en ajustant la résistance de la grille (R_g).

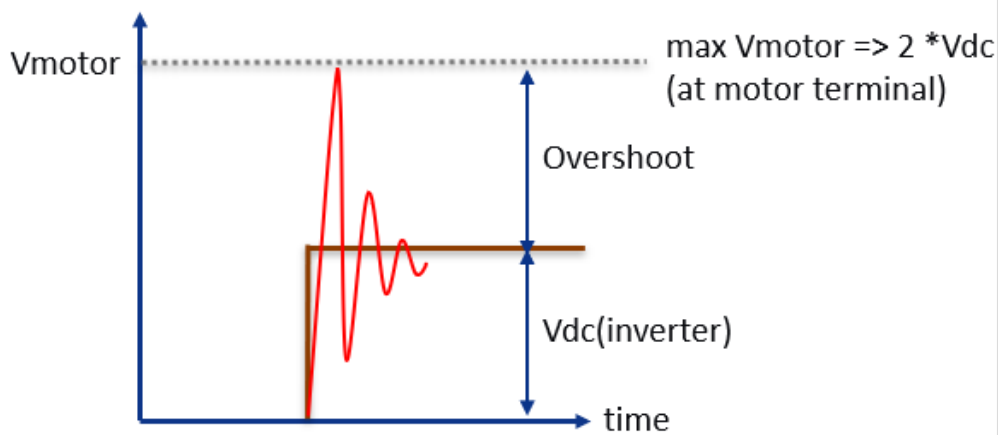


Figure 6. Tension aux bornes du moteur

Lorsqu'on augmente la valeur R_g , le dv/dt à l'allumage et à l'extinction diminuent tous les deux. Cependant, le dv/dt à l'allumage diminue significativement avec $R_{g\text{on}}$ dans la plage optimale. La valeur R_g doit être optimisée pour obtenir le $dv/dt < 5 \text{ kV}/\mu\text{s}$ désiré.

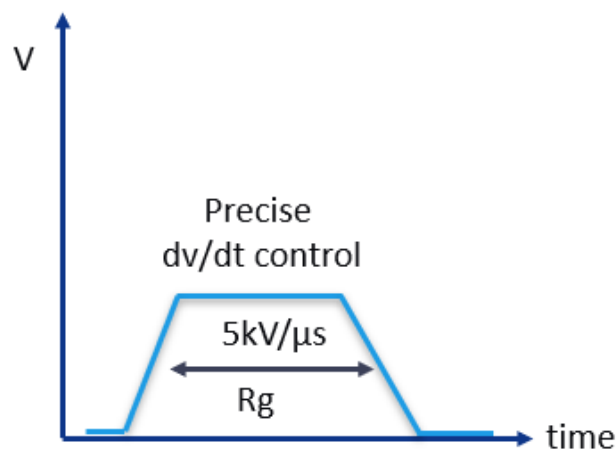


Figure 7. Optimisation du dv/dt grâce à la résistance R_g et à l'IGBT7

Microchip peut fournir la courbe de R_g et le dv/dt correspondant sur demande spéciale, en vue de l'optimisation du dv/dt , ce qui simplifie les principaux problèmes de conception pour les ingénieurs de conception et d'application des entraînements de moteurs industriels.

Pilotage de grille simplifié et sans tracas

La capacité C_{GE} (Gate Emitter, grille-émetteur) et la capacité C_{GC} (Gate Collector, grille-collecteur) sont équilibrées pour laisser à l'IGBT le contrôle total sur le dv/dt , et pour optimiser la forme d'onde de commutation ; la C_{GE} est conçue pour éviter les effets

parasites à l'allumage, de sorte que l'alimentation nulle pour l'extinction soit possible (alimentation de pilote de grille unipolaire).

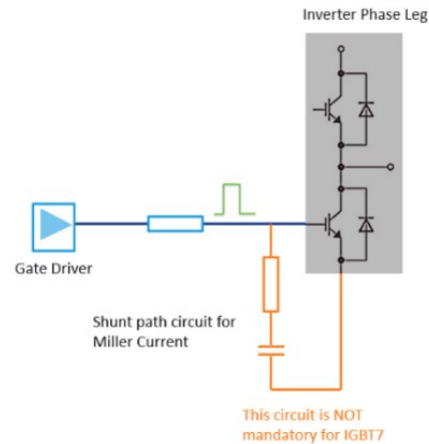


Figure 8. Circuit de pilotage IGBT7

Capacités de courant plus élevées

La puce IGBT7 possède de façon intrinsèque plus de capacités de courant que la génération précédente IGBT4. Ainsi, elle dispose d'une puissance de sortie supérieure pour les empreintes données, entraînant un changement de la hauteur d'axe, ce qui implique qu'une hauteur d'axe moindre peut être utilisée pour en remplacer des plus hautes. La densité de puissance globale est donc aussi augmentée, car davantage de puissance peut être condensée dans une zone donnée, ce qui évite de mettre en parallèle de nombreux commutateurs, réduit la complexité et améliore la fiabilité et la durabilité. La densité de puissance plus élevée réduit les coûts de nomenclature pour le système d'alimentation, et permet d'accélérer les délais de commercialisation.

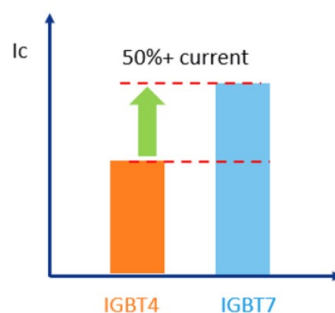


Figure 9. Augmentation de la hauteur d'axe avec un courant 50 % plus fort dans le même boîtier

Inductance plus faible/profil bas des boîtiers

Les boîtiers de Microchip à faible inductance parasite réduisent les dépassements de tension, améliorant la durabilité et la fiabilité. Le profil bas permet d'encapsuler davantage

de puissance dans moins de volume, ce qui améliore la densité de puissance lors d'une utilisation avec la technologie IGBT7.

Grâce à des dépassements de tension plus faibles, il devient relativement plus facile pour l'utilisateur d'utiliser des modules 1200 V pour la liaison DC jusqu'à 700-800 V au lieu de 1700 V, à condition que l'agencement global de l'onduleur soit faiblement inductif avec un *busbar* en sandwich. Il est possible de réaliser ainsi des économies considérables non seulement pour les modules mais aussi pour la carte du pilote de grille, diminuant de fait les coûts de conception du système d'alimentation.

Boîtier	D3	SP6	SP6P	SP6LI
Hauteur :	30 mm	17 mm	17 mm	17 mm
Inductance parasite :	30 nH	15 nH	5 nH	2,9 nH
Dépassement de tension	de ~350 à 450 V	~225 V	~ 75V	~< 50 V

Tableau 4.

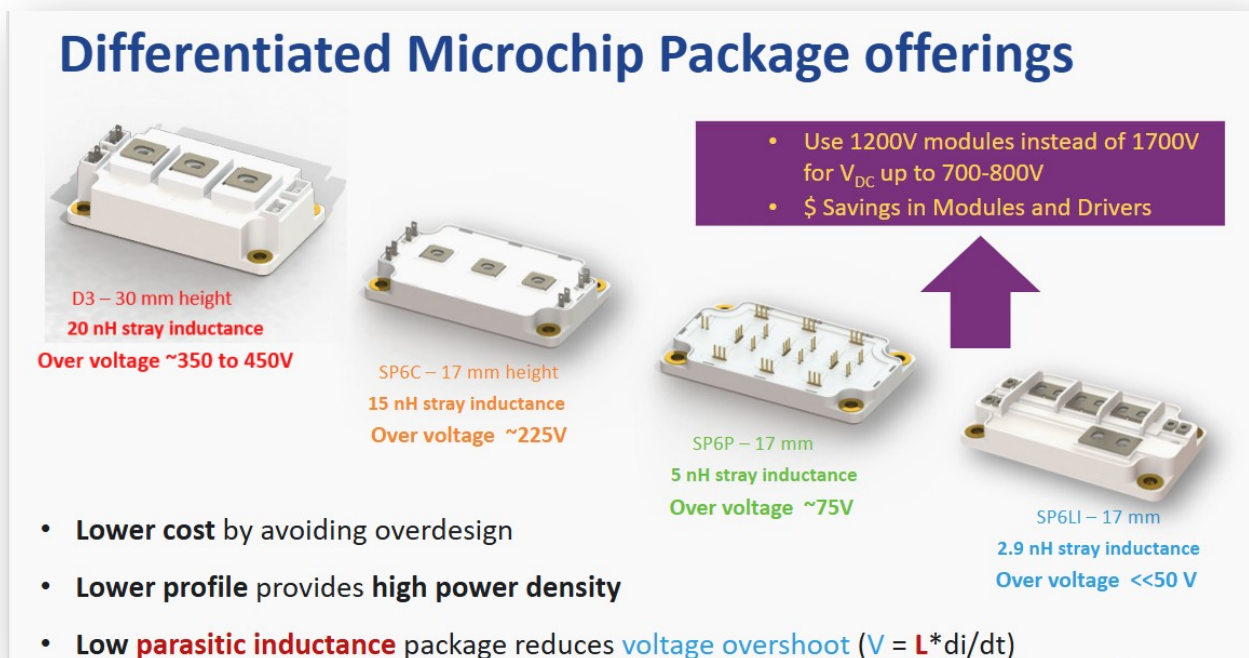


Figure 10. Les différents boîtiers Microchip

For Multiple Markets and Megatrends

Key Megatrends: Sustainability, Data Center, E-Mobility and A&D



Figure 11. Principales applications de l'IGBT7

Les caractéristiques de l'IGBT7 et les avantages dont bénéficient ses utilisateurs rendent ces modules de puissance idéaux pour de nombreuses applications ou mégatendances, pour des applications à fréquence de commutation faible ou moyenne. La facilité d'utilisation sans aucune complexité dans le mécanisme de pilotage de la grille fait de la conception un véritable jeu d'enfant et rend inutile la conception de nouveaux pilotes. Les différentes topologies peuvent être utilisées immédiatement comme éléments de base de convertisseur pour de nombreuses applications, offrant une conception plus flexible et accélérant les délais de commercialisation.

Les modules de puissance IGBT7, grâce à leur polyvalence, apportent des avantages considérables aux clients, comme la puissance, la précision et les performances. Ils permettent de nombreuses applications dans le domaine de l'énergie solaire et éolienne, entraînements de moteurs, systèmes de stockage d'énergie (ESS), véhicules commerciaux et agricoles, centres de données, industrie ferroviaire, e-mobilité, transmission et distribution, ainsi que l'aviation.

Références :

<https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/power-quality/cable-length-vfd-motors>

https://www.nema.org/docs/default-source/standards-document-library/mg-1-part-31-watermark.pdf?sfvrsn=649fb42f_1

Application Manual Power Semiconductors (Semikron)

TRENCHSTOP™ 1200 V IGBT7 T7 Application Note (Infineon) (AN2018-14)

Amit's Tech Corner, Microchip Aviation and Defense Newsletter Edition 23 Dec 2024